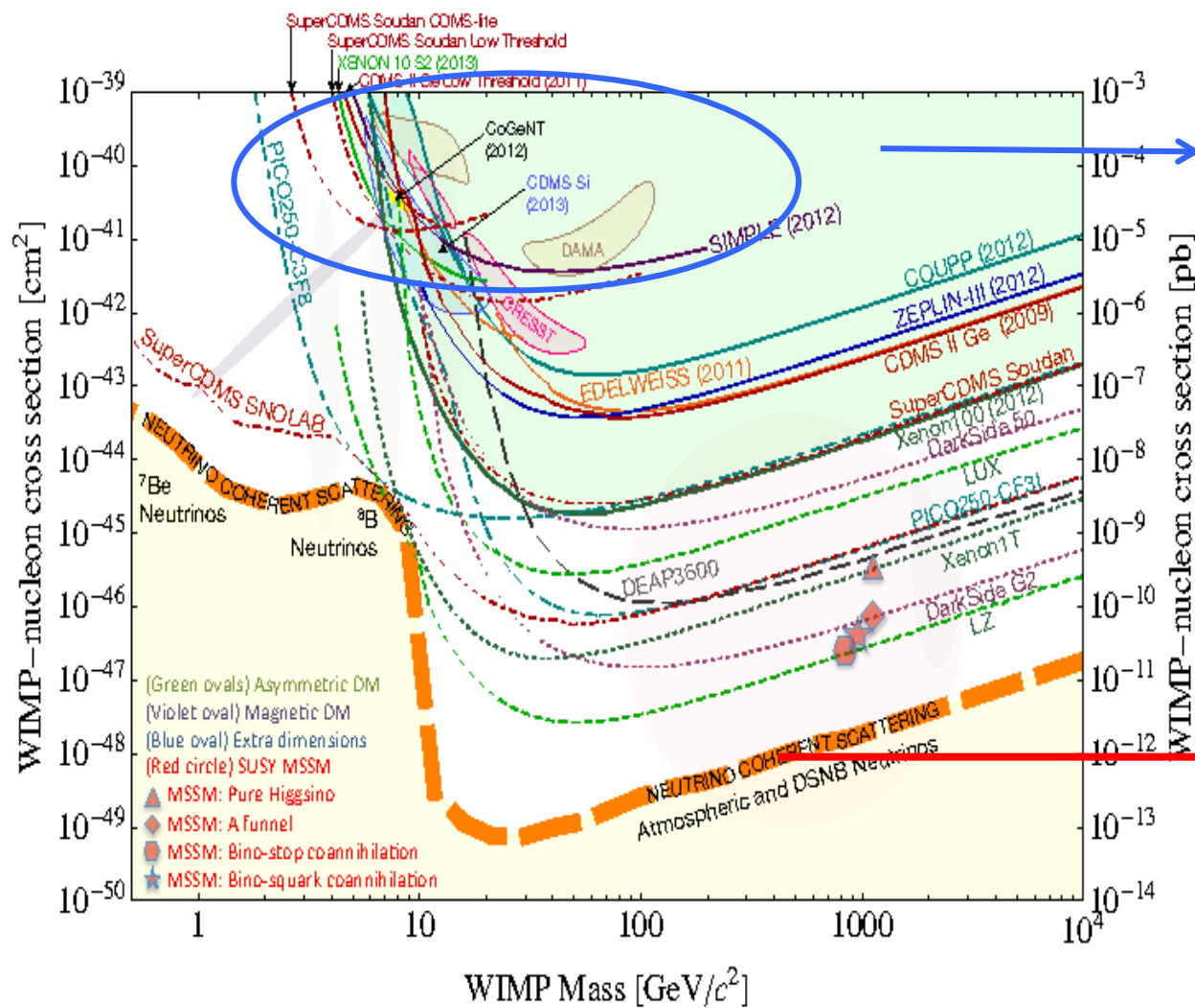


方向感度をもつ暗黒物質探索 の基礎研究 (B02計画)

中 竜大(名古屋大学)

身内賢太郎(代表:神戸大)、田中雅士(分担:早稲田大)

方向感度を持った探索実験



季節変動とは異なる情報からの探索
 ⇒ 方向分布の非対称性
 ⇒ 日変動

SD ⇒ ガス検出器による実験技術
 SI ⇒ 固体検出器による大質量化
 ⇒ 光・電子信号からの方向情報取得
 (柱状再結合・・・)

Neutrino boundを超えた探索を可能にする検出技術提案

アクティビティ

B02班アクティビティ：若手研究会

- 2014～2016年度までに 計8回開催

領域横断の中性子測定コンソーシアムへ

高エネルギーニュース volume35 number4 (Jan/Feb/Mar 2017)

⇒現在、神戸、名古屋、早稲田、大阪、東大ICRR、東北で連携

※水越氏ポスター参照

- 2016年度 3回開催

- 第1回A,B,C班合同研究会/第6回B02班若手研究会

2016年7月16～7月17日,名古屋大学

- 第1回B,E班合同若手研究会/第7回B02班若手研究会

2016年11月21～11月22日,神戸大学

- 第8回B02班若手研究会

2017年3月29～3月31日,石川県加賀市山代温泉「ゆのくに天祥」

■ 研究紹介

地下素核実験のための中性子測定コンソーシアム

早稲田大学 理工学術院 理工学研究所

田中 雅士

masashi.tanaka@aoni.waseda.jp

神戸大学 大学院理学研究科物理学専攻

帝釋 稜介

158s113s@stu.kobe-u.ac.jp

早稲田大学 大学院先進理工学研究所

鈴木 優飛

yuto@kylab.sci.waseda.ac.jp

名古屋大学 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 F 研究室

吉本 雅浩

yoshimoto@flab.phys.nagoya-u.ac.jp

2017年(平成29年)3月7日

1 中性子測定コンソーシアムとは

本コンソーシアムは平成26年度より開始した新学術



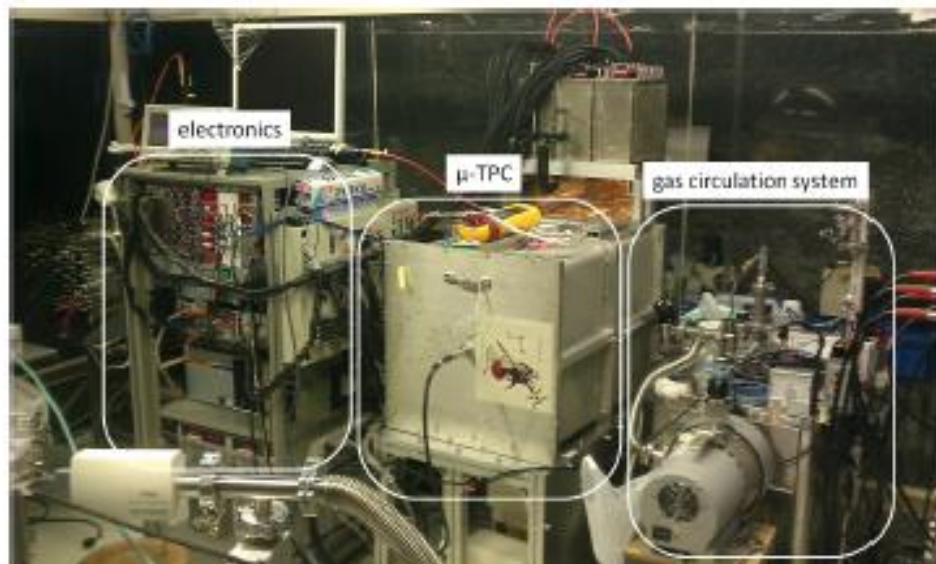
B02班アクティビティ：各種成果

- 2016年度(2014～2016累積)
 - 査読付論文 6編 (14編)
 - 査読無論文 1編 (1編)
 - 国際会議口頭発表 10件 (29件)
 - 国際会議ポスター発表 6件 (6件)
 - 国内会議発表 77件 (175件)
 - アウトリーチ 9件 (18件)
 - メディア等掲載 1件 (5件)
 - 受賞 3件 (8件)
 - 博士論文 2編 (2編)
 - 修士論文 3編 (9編)

方向感度を持つ検出器技術

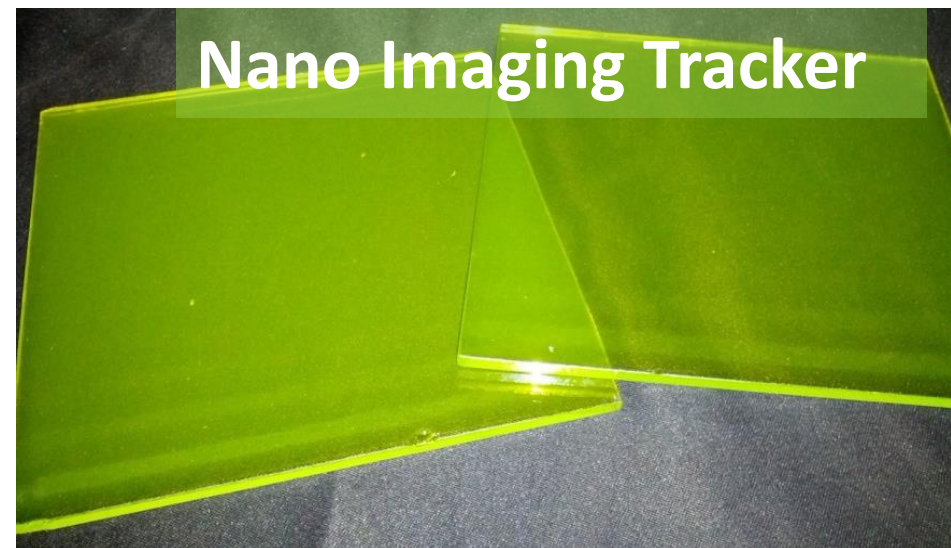
NEWAGE

ガスTPC+ μ PIC

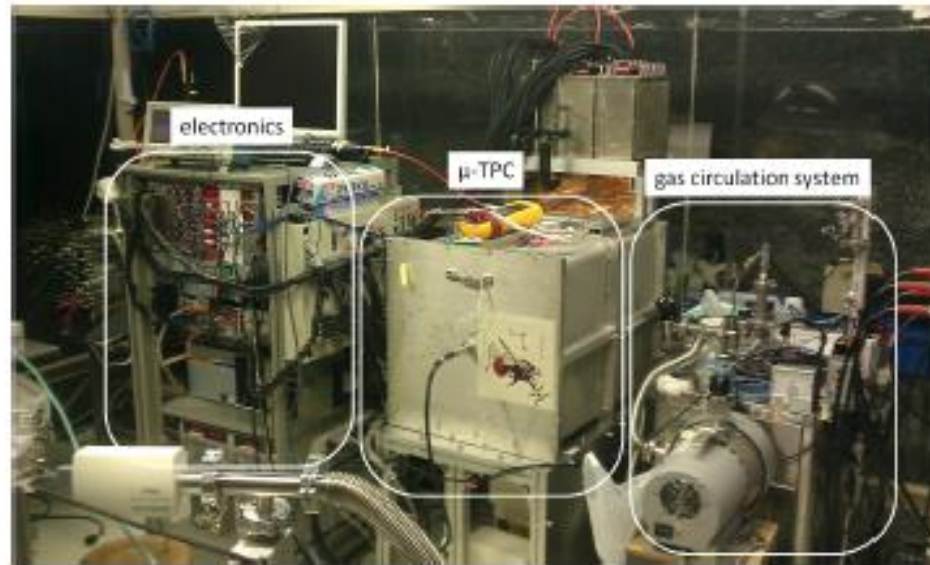


NEWSdm

超微粒子原子核乾板
(Nano Imaging Tracker : NIT)



1. NEWAGE

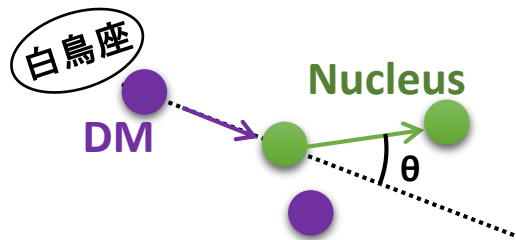


NEWAGE概要

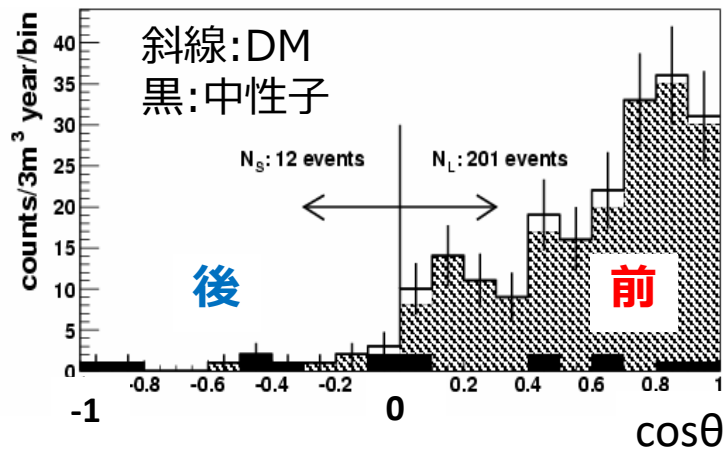
(NEw generation WIMP search with an Advanced Gaseous tracker Experiment)

- 神戸大学主導の**方向に感度を持つ**暗黒物質直接探索実験
- 到来方向異方性の観測を目指す
- ガス検出器「マイクロTPC」を用いる

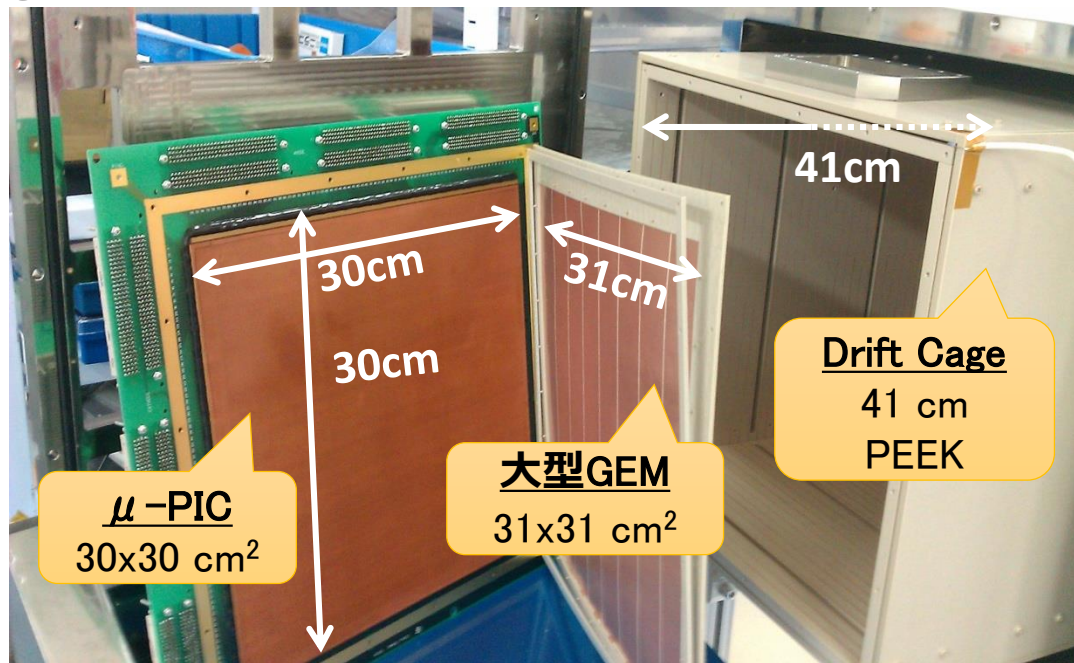
- 検出領域
30×30×41 cm³
- ガス
CF₄(0.1気圧)



期待される到来方向異方性(数倍)

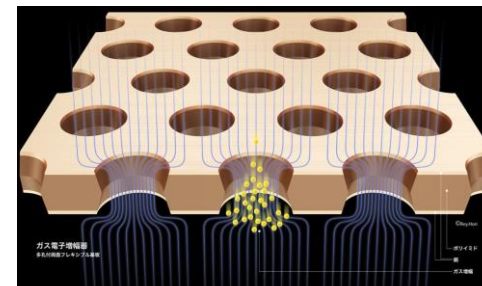
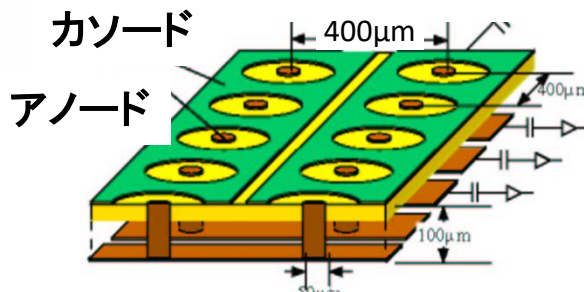


Physics Letters B 578 (2004) 241–246



μ -PIC : アノードピクセルの間隔400 μ m (ガス利得 $\sim 10^3$)

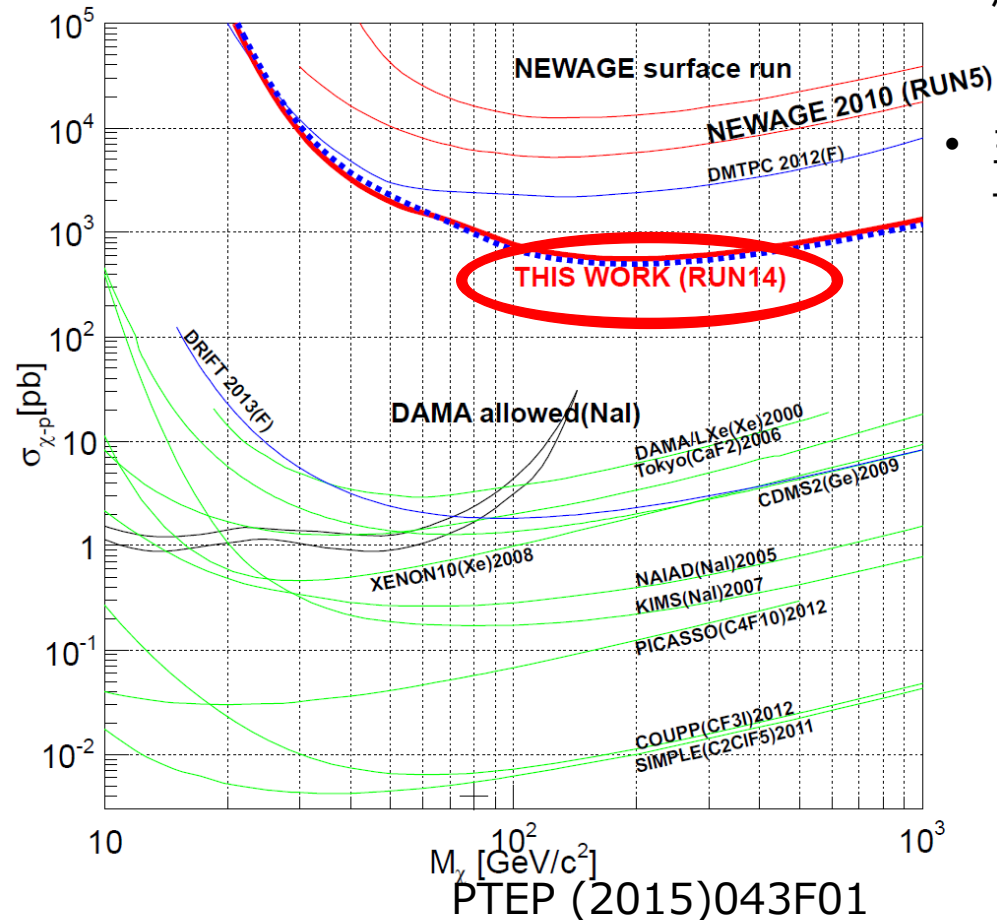
GEM : 中間増幅器 (ガス利得 ~ 10)



NEWAGEの課題

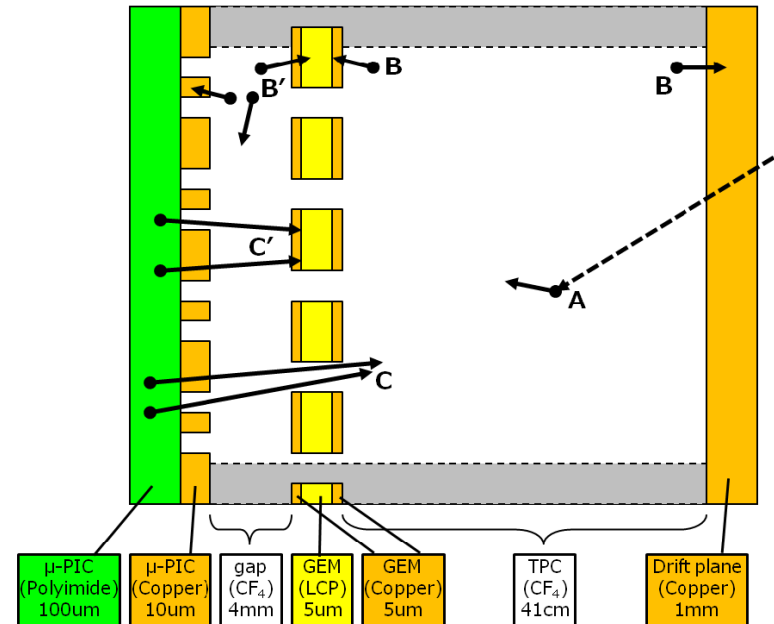
RUN14の条件

- period : 2013/7/20~8/11, 10/19~11/12
 - live time : 31.6 days
 - fiducial volume : $28 \times 24 \times 41 \text{ cm}^3$
 - mass : 10.36 g
 - exposure : 0.327 kg · days
- SD 90% C.L. upper limits and allowed region



- 方向感度では世界最良 : $557 \text{ pb} @ 200 \text{ GeV}$
- 従来型の暗黒物質直接探索実験の感度には届いていない

- 主なBG : μ -PICからの α 線 (下図 C, C')
 \rightarrow α 線放射の少ない(low- α) μ -PICの製作
B02としての取り組み



low α μ -PIC製作：計画通り実行

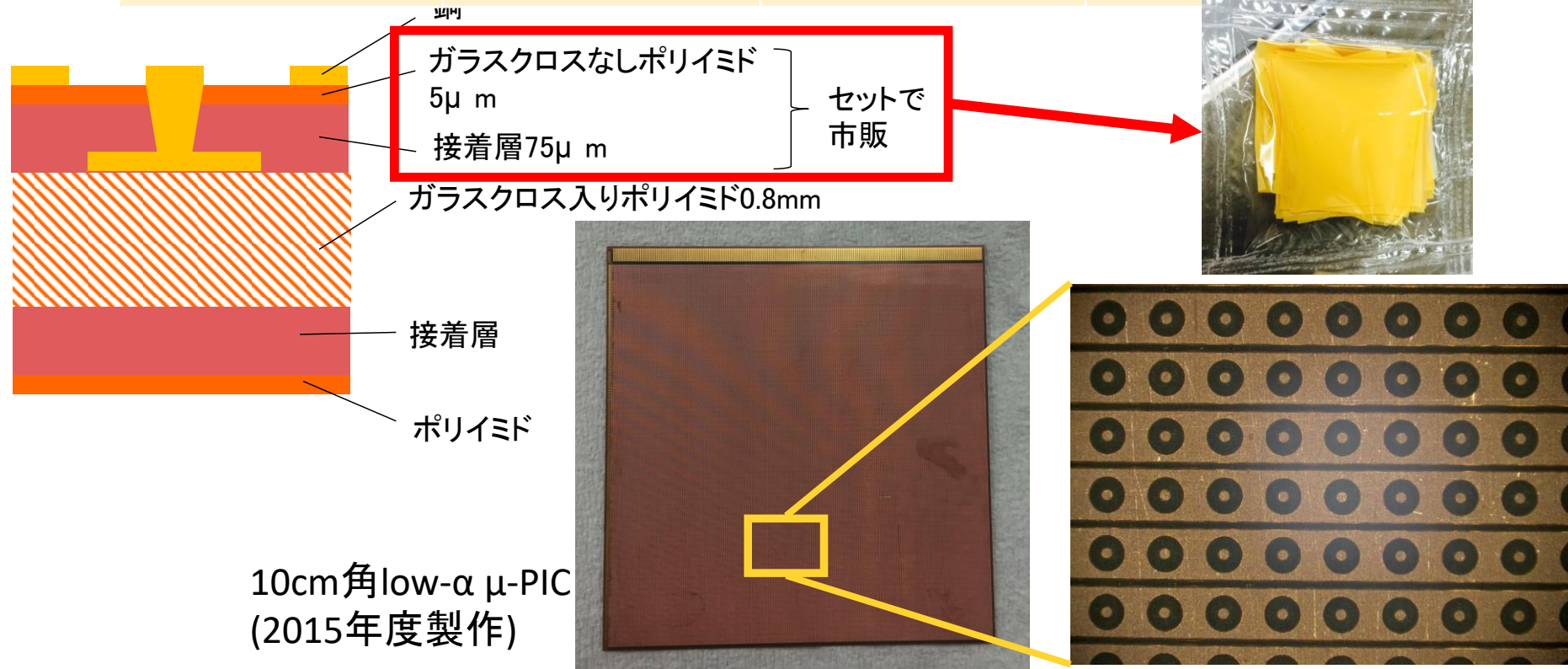
橋本+DNP

2015年度 10cm角製作

2016年度 30cm角製作 10cm角試験

- ガラス強化されたPI100 μ m部分を新材料に取り替えた

測定試料	^{238}U [ppm]	^{232}Th [ppm]	備考
PI100 μ m	0.39 \pm 0.01	1.81 \pm 0.04	以前の μ -PIC材料
PI+エポキシ	< 2.98$\times 10^{-3}$	< 6.77$\times 10^{-3}$	新材料



10cm角low- α μ -PIC
(2015年度製作)

2016年度報告① (10cm角 μ PIC試験)

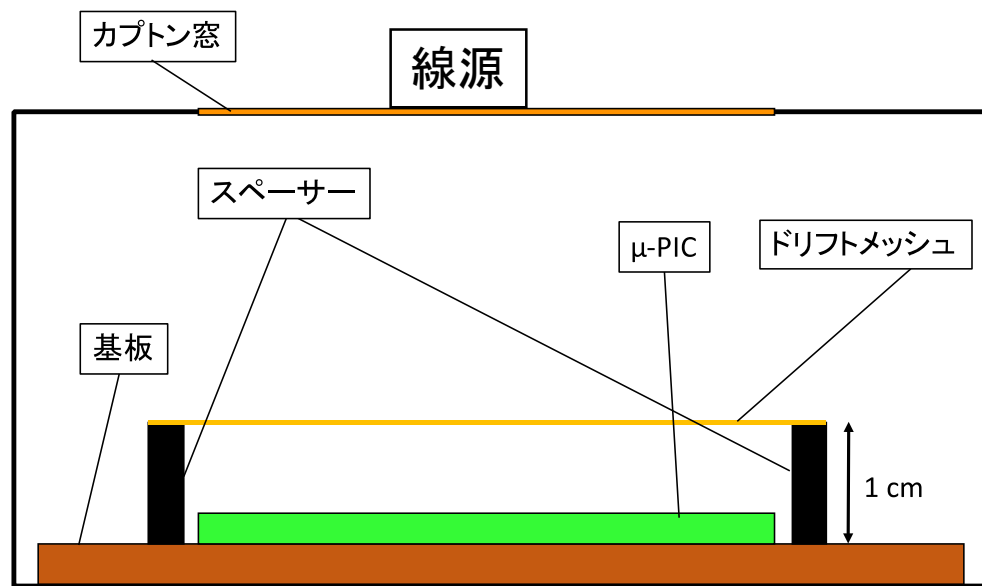
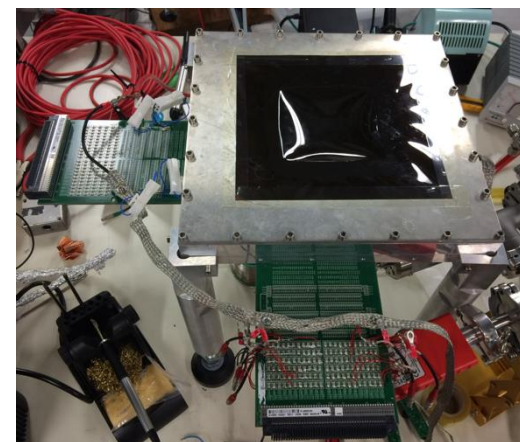
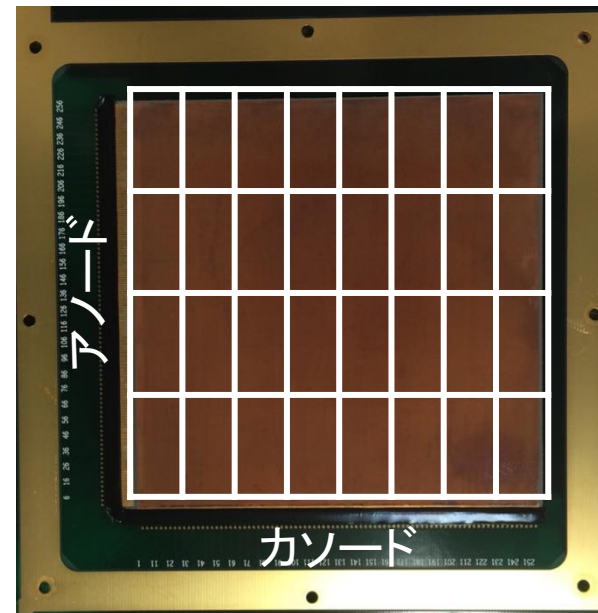
橋本ポスター参照

内容

- Low α μ -PIC試作機のゲインカーブ、ガスゲインの位置依存性、エネルギー分解能の測定
- 標準 μ -PICとの比較

装置

- 全体：アノード256ch \times カソード256ch
- アノード64ch \times カソード32chのブロックごとに信号取得(1ブロック:2.5cm \times 1.25cm)



プリアンプ: CS515-1
容量勾配: 15eV/pF
増幅率: 2.0 V/pC

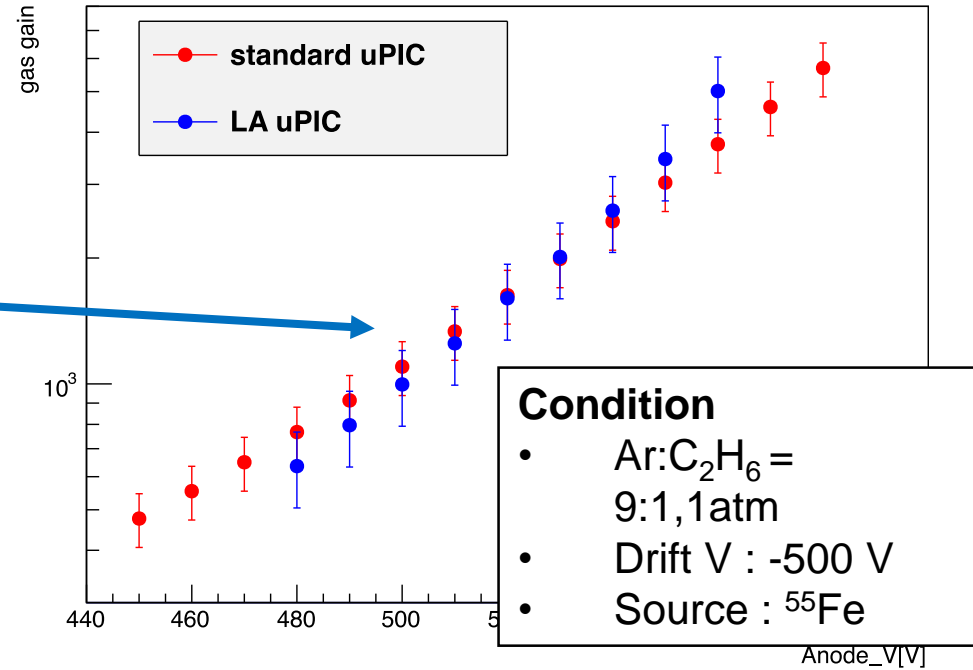
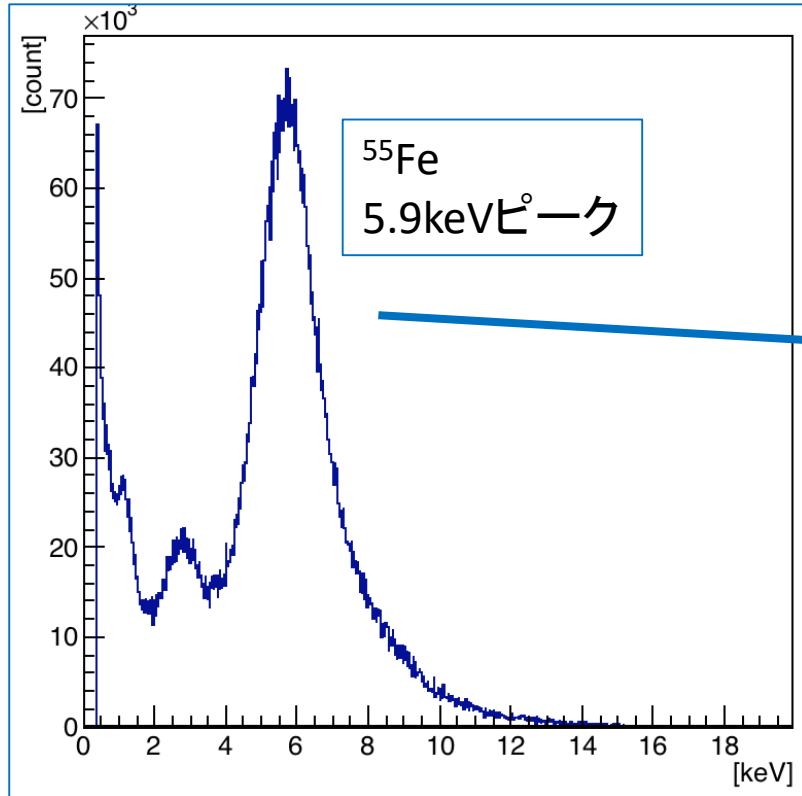
MCA: MCA8000D
energy range: 0-1V
ビット数: 2^{10}

Cathode readout

MCA

ゲインカーブ

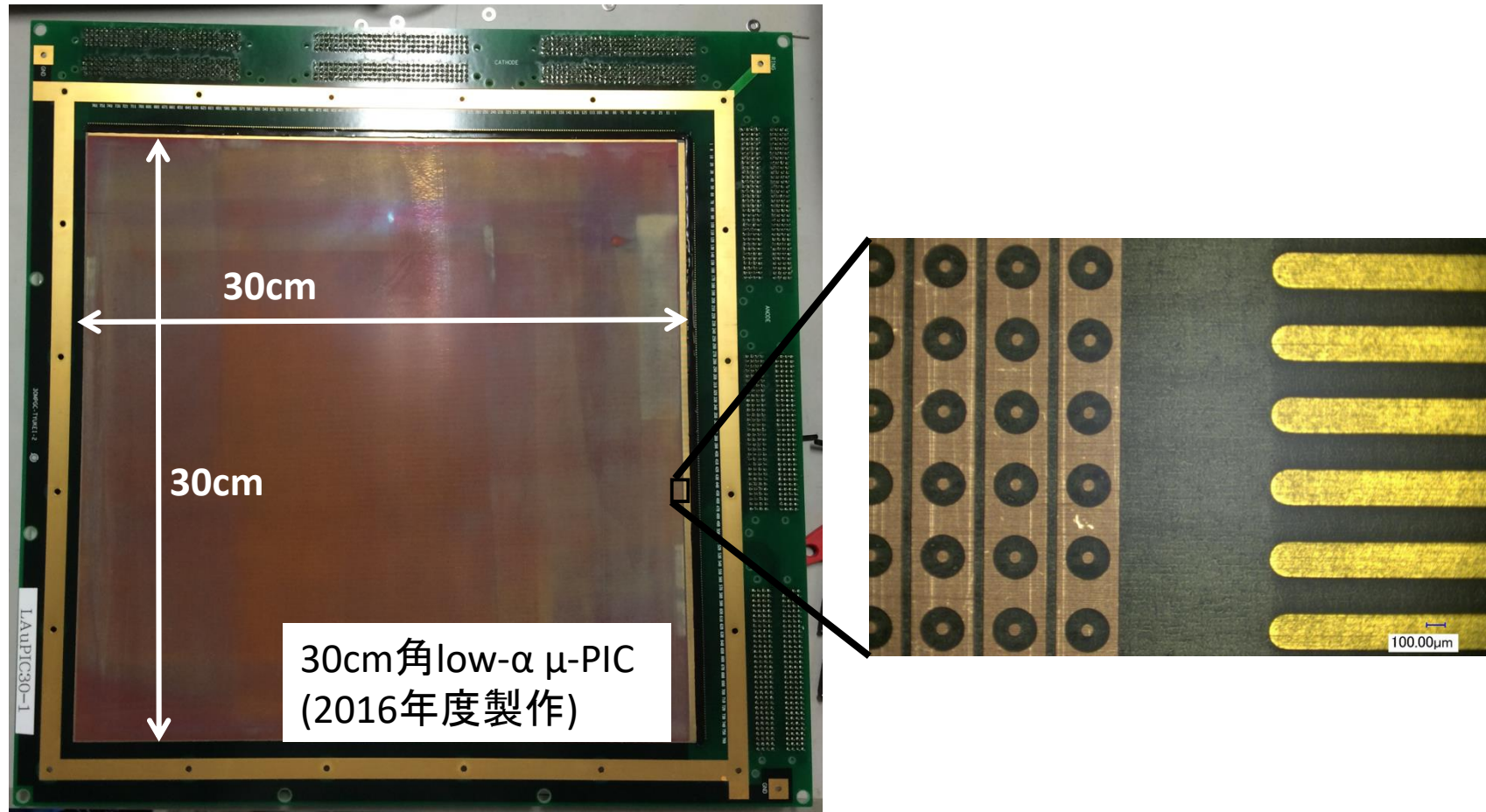
橋本ポスター参照



- Low α μ -PICは標準 μ -PICと同程度のガスゲイン **OK**
- 傾きが異なる原因は調査中
 - 電場構造の違いの有無
 - アノード電極の高さの違いの有無

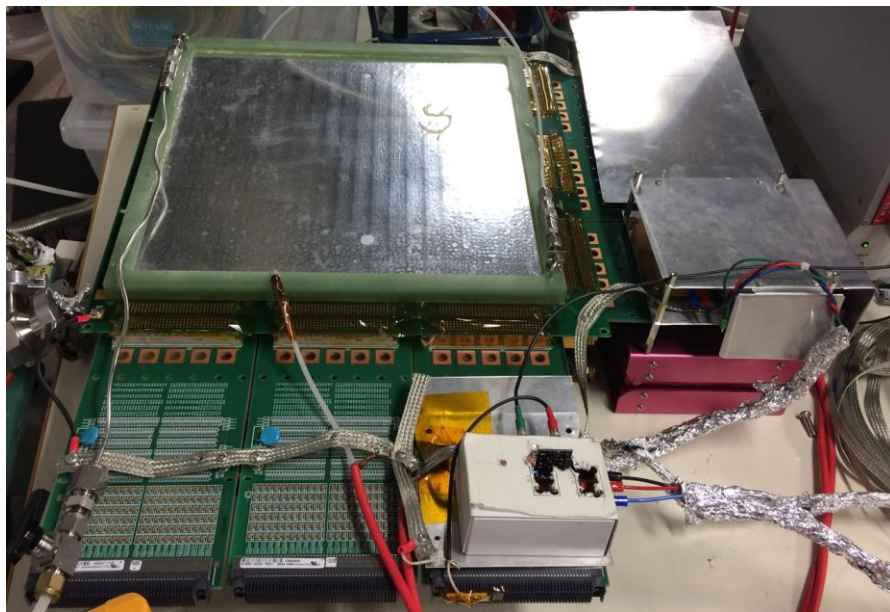
2016年度成果：30cm角Low α μ -PIC製作

- 30cm角のLow α μ -PIC実機を製作 橋本ポスター参照
 - 材料変更による膨張率の違いなどでのアライメント悪化が危惧された。→ アノード電極の位置精度の悪化はなく、むしろ良くなった
many thanks to DNP
 - 検出器左上、右上、左下、右下、中央の5ヶ所で位置ズレを測定、
すべての部位でズレの大きさ 1 μ m以下 OK

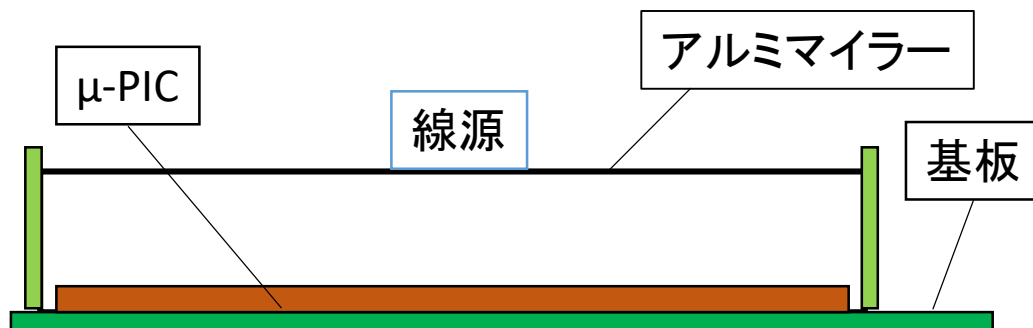


30cm角Low α μ -PIC試験

橋本ポスター参照

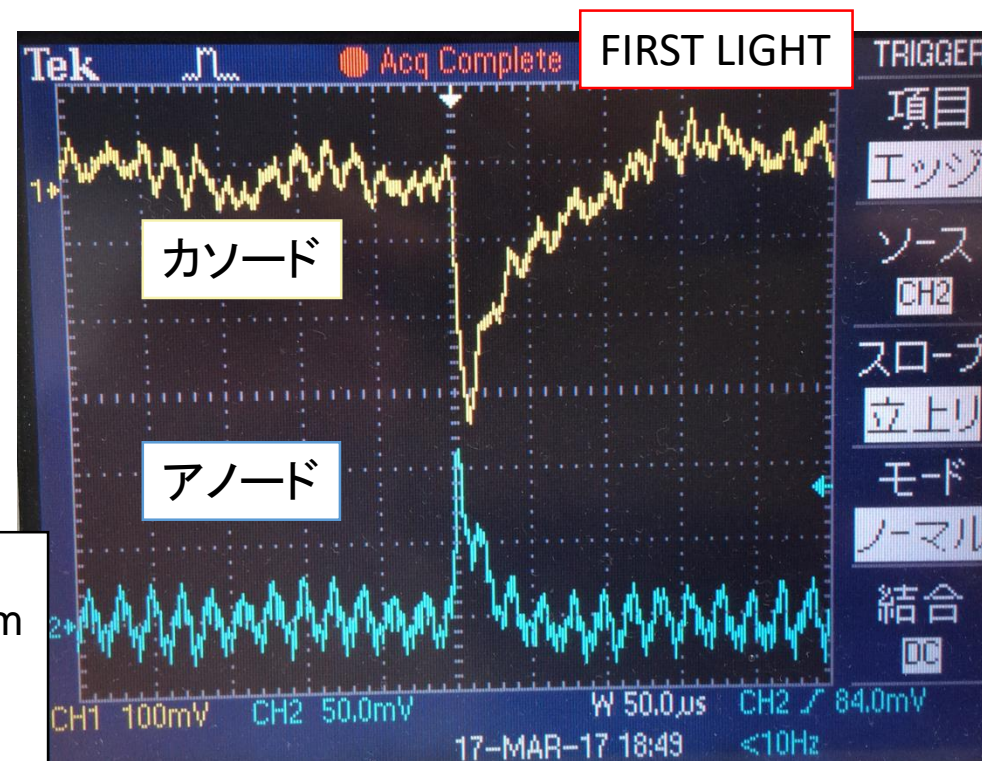


- ガスフローパッケージを用いて試験
- アノードカソード両方から読み出し
 - アノードプリアンプ:
0.7 V/pC
 - カソードプリアンプ:
2.0 V/pC



condition :

Ar:C₂H₆ = 9:1, 1atm
DriftV : -500 V
AnodeV : 480 V
Source : ⁹⁰Sr



今後

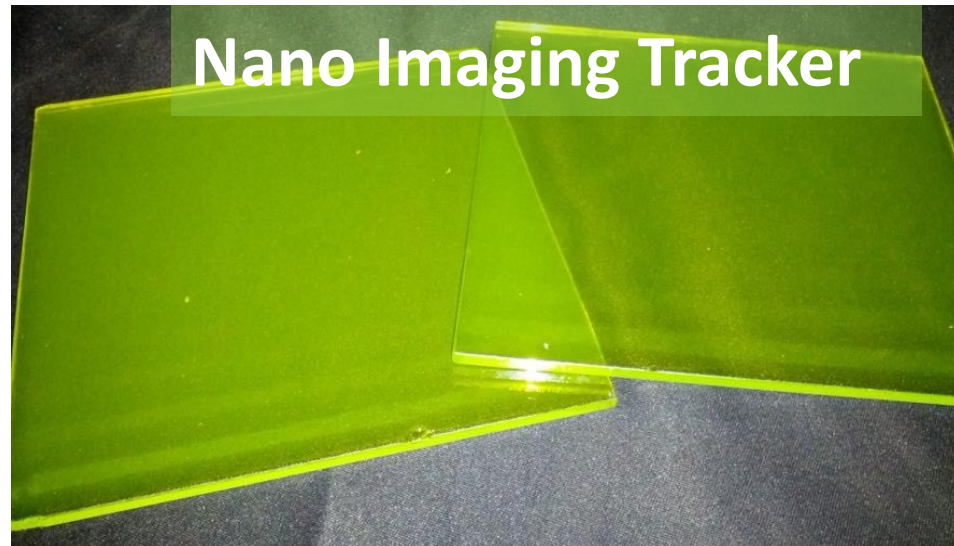
- 30cm角 low- α μ -PIC : 55Feを用いて試作機と同様の性能評価 7月中に完了予定

⇒ 神岡のNEWAGE-0.3b にインストール 調整の後
暗黒物質RUN (8月~)

秋以降にBGの様子・制限更新 (1桁以上を見込む) など
発表

- 同様にlow- α μ -PICによるSI探索も
- さらにその先 : 800umの基材部分も低BG化した 低BG μ -PICの製作へ

NEWSdm実験



The NEWSdm Collaboration

[Nuclear Emulsions for WIMPs Search - directional measurement]

	Japan Chiba Nagoya		Russia LPI RAS Moscow JINR Dubna SINP MSU Moscow (Yandex) ⇒ computing science
	Italy Bari LNGS Naples Rome		Turkey METU Ankara

日本側:

名古屋⇒基本すべてのところに寄与
千葉⇒デバイス性能の議論(写真化学)

イタリア:

ナポリ⇒解析システム、シミュレーション
LNGS ⇒ 地下実験環境

名古屋とナポリが主要な研究開発

R&Dプロジェクトとして、LNGSにてオフィシャルに活動ができるようになっている

実験概要

デバイス製造+開発(名古屋)



- Production scale : ~ 100 g/process (~3-4 h)
- * ただし、脱イオンプロセスで1日程度かかる(従来法がノイズ生成の原因になっていたため、独自に改良)
- * ゲルの生成(まだフィルムではない)

地下実験(LNGS)



- 名古屋から輸送したゲルを地下でフィルム化
 - 実験
 - 現像処理
- ※低バックグラウンド環境が必要

スキャンニング+解析(名古屋+ナポリ, LNGS)



- ◆ 地上ラボで読み取り+解析(名古屋+ナポリ)
- ◆ データはコラボレーション全体でシェア

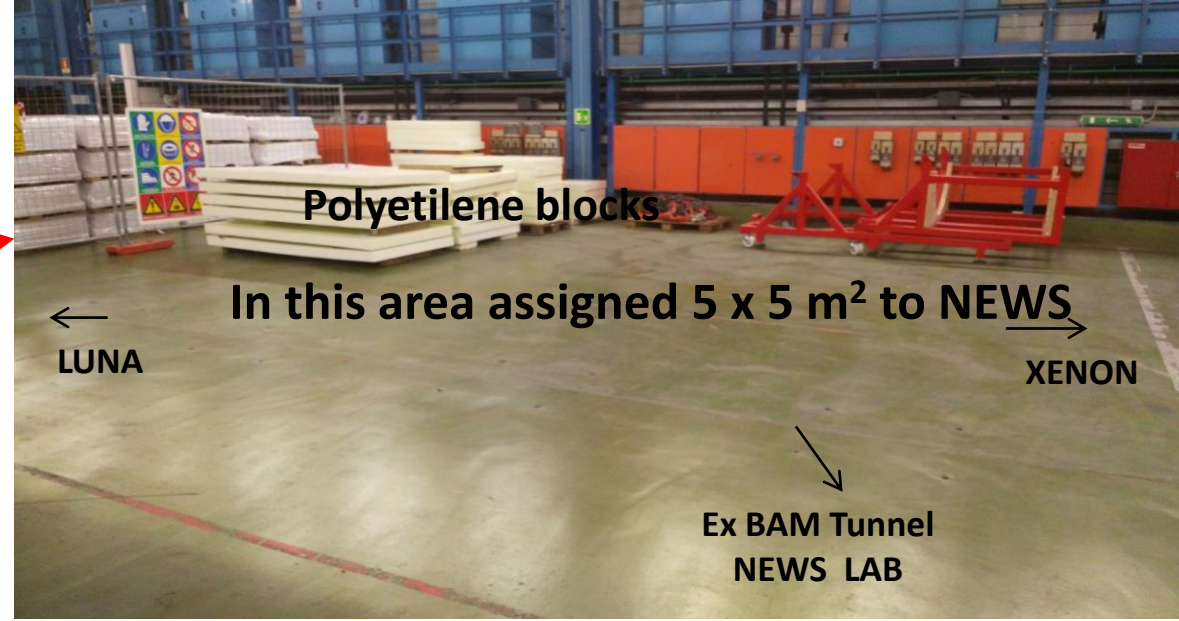
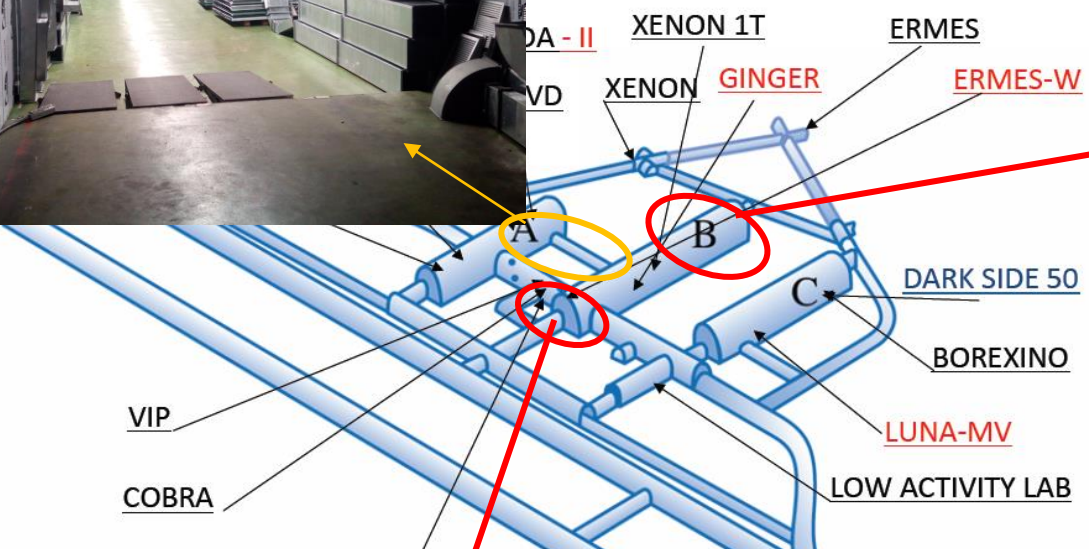
デバイス製造からLNGSで行う方向

(予算は獲得済み。現在、設計を開始⇒来年度初めに設置予定)

Environment and shield



Underground laboratory, Italy



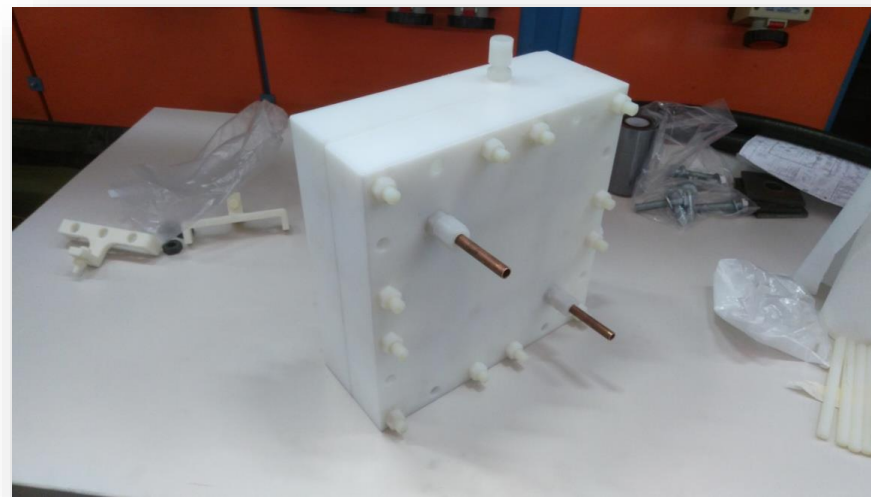
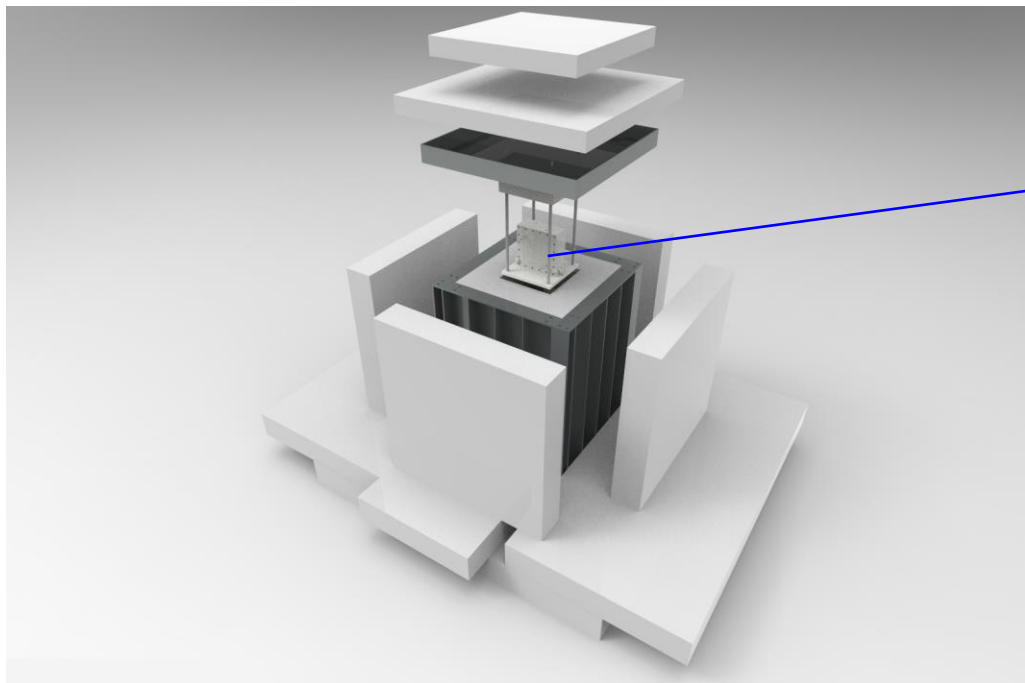
- フィルム作成
- 化学処理
- 現像処理

最低限の検出器の処理は可能な環境を構築
⇒地下でのデモンストレーション

* テストファシリティのため、あまりクリーンな環境ではない



Pilot-run (BG run) system

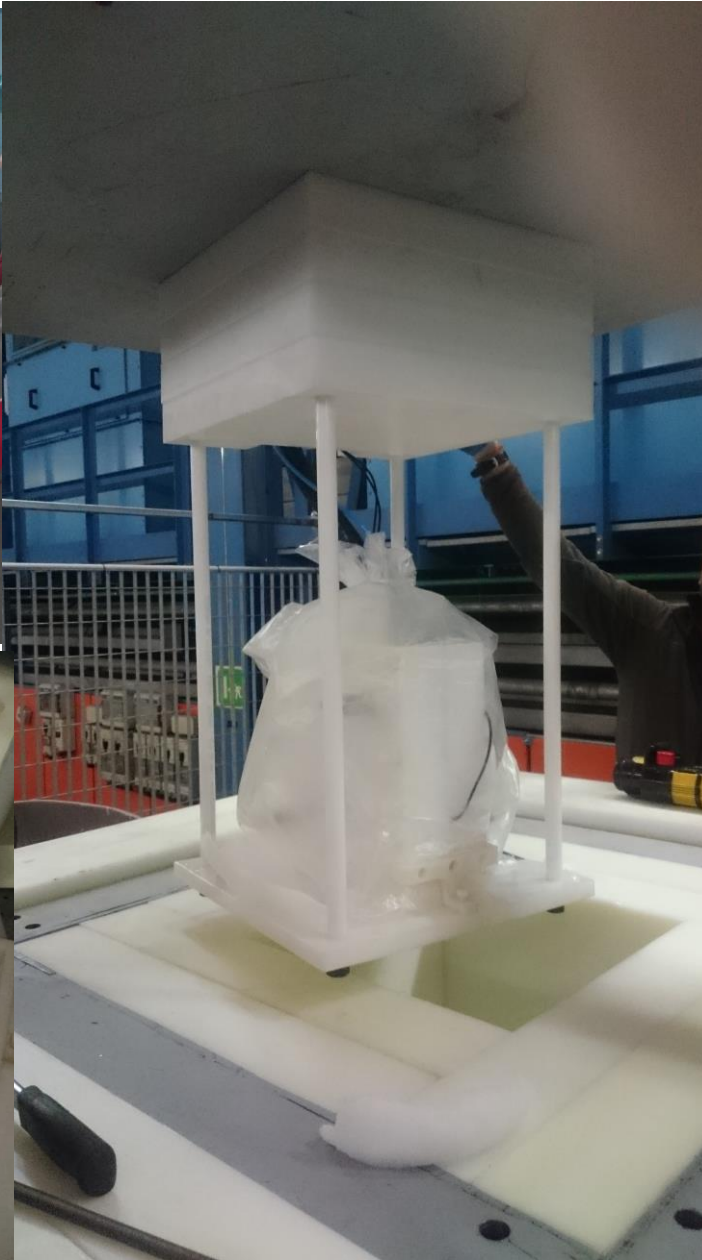


Cooling system to keep the stability of device and improvement of S/N by low-temperature

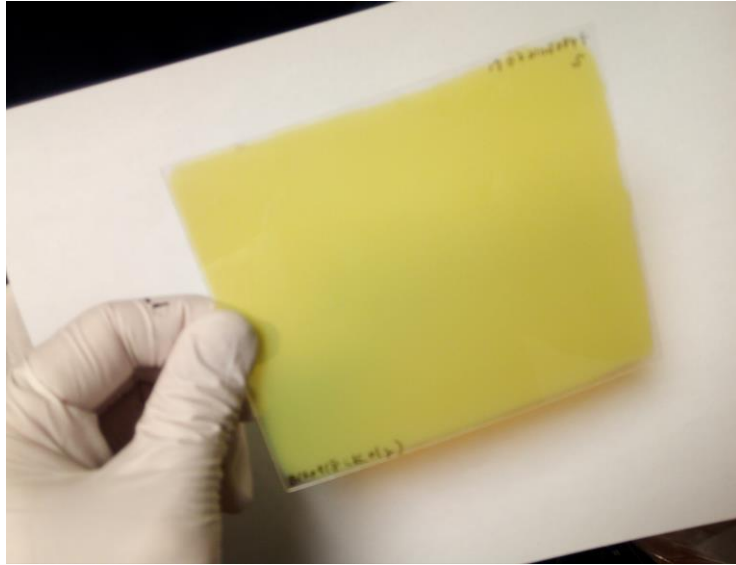
スペクトルは、XENONグループが用いているものを採用

	Event rate [/kg/d] w/o shield	Event rate [/kg/d] w/ shield	method
Environment γ -rays	1×10^7	5×10^3	Geant4
Environment neutron	$\sim 1-2$ /kg/day	< 0.1 /kg/day	Geant4
Cosmogenic neutron	$< 1 \times 10^{-3}$ /kg/day	2×10^{-3} /kg/day	Geant4

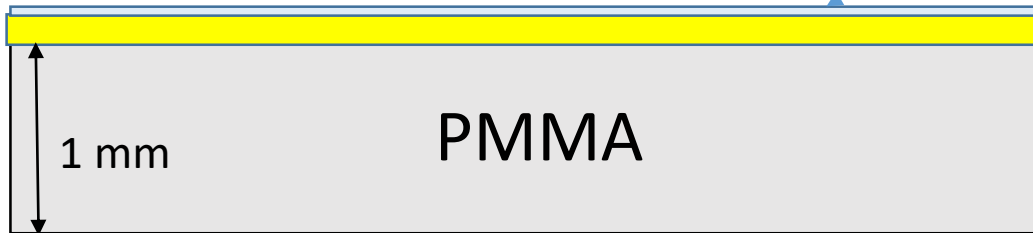
Preliminary



テスト実験標準フィルム



Protection coat by gelatin



Size : 10 x 12 cm²

NIT layer thickness : ~ 50-70 μm

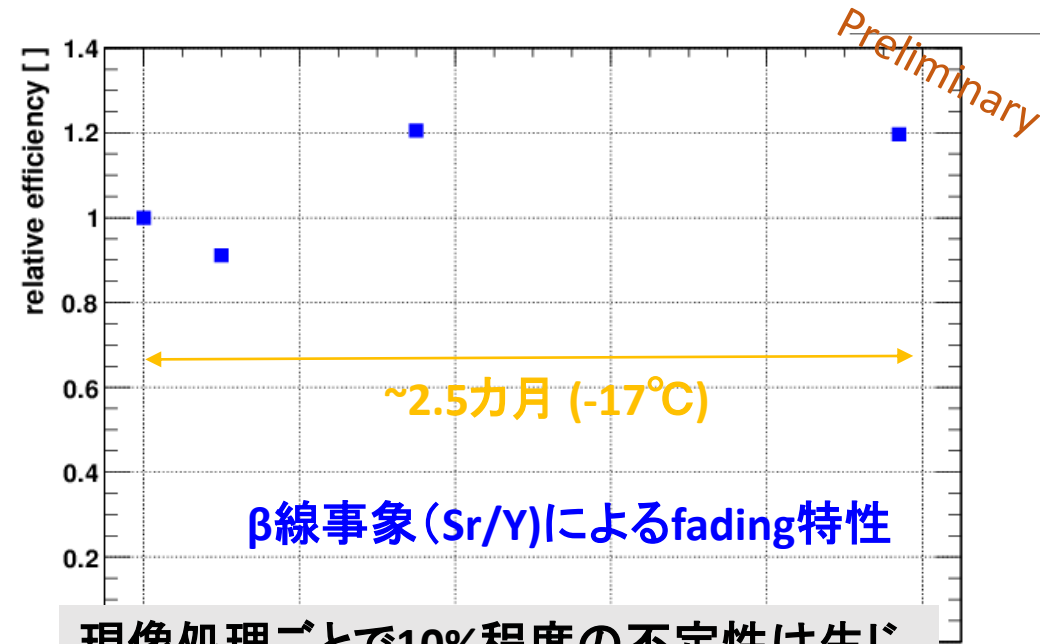
Base material : PMMA

(pre-treatment in Nagoya by ourselves)

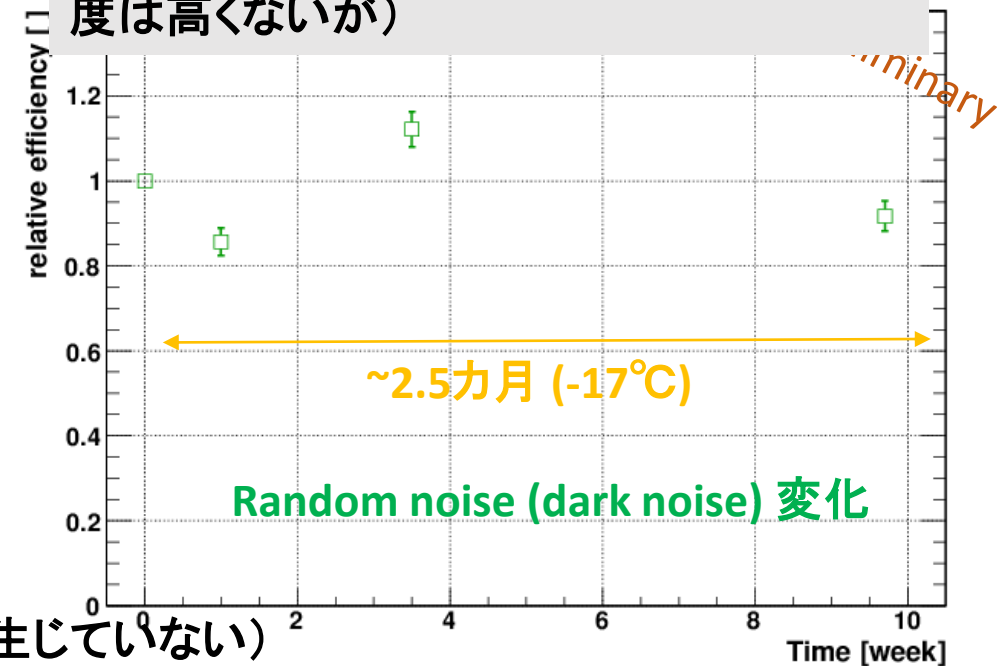
Target mass

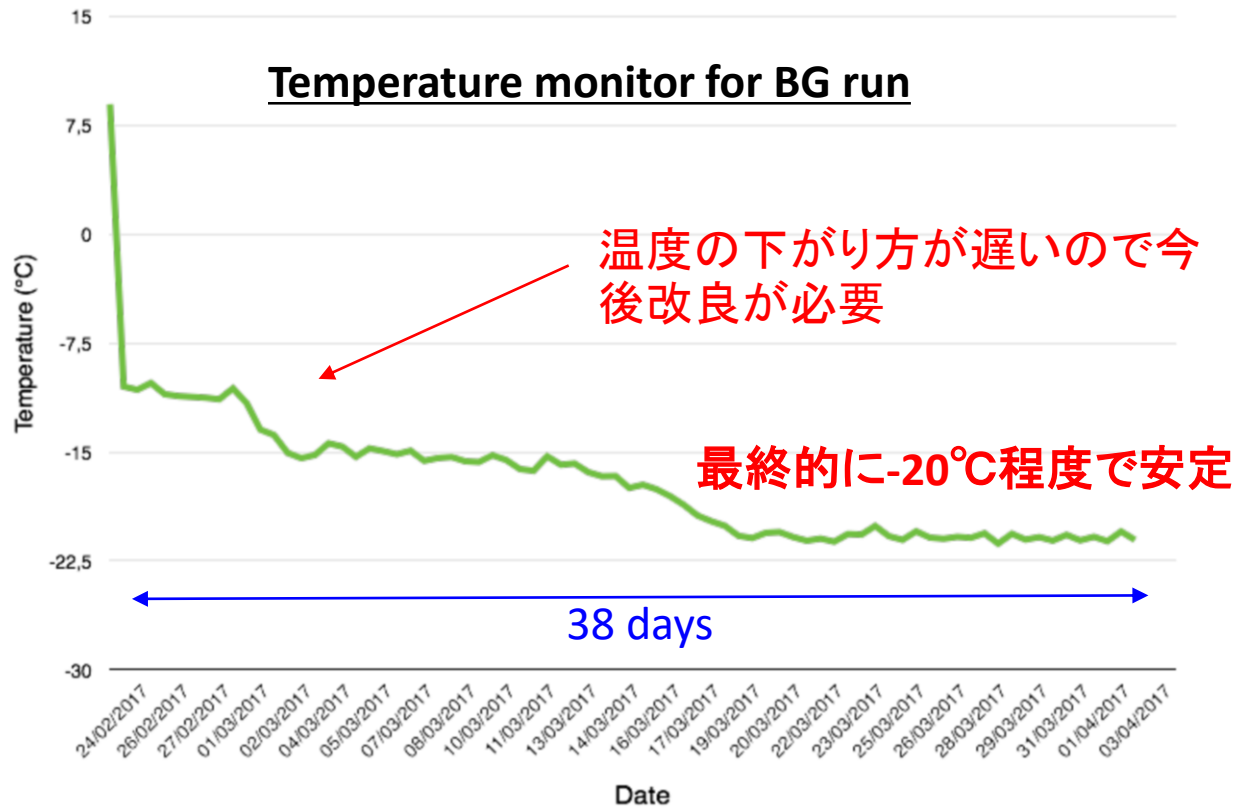
One-side pouring : ~2 g/film

本実験データは現在解析中
(初期解析では大きな問題は生じていない)



現像処理ごとに10%程度の不定性は生じていそう⇒処理の安定性追求(現状優先度は高くないが)





Run :

2017/2/22-23 : フィルム作成

2017/2/24 検出器設置



約1カ月

2017/4/3 検出器取り出し⇒現像処理

課題:

- ✓ 校正用線源の使用手続き
- ✓ 検出器設置と取り出しの効率化
- ✓ 処理に使う水の確保⇒Borexinoの超純水が使用可能
(地下でのくみ出しが可能)
- ✓ 今後のスケールアップや赤道儀設置に向けたデザインの検討

Analysis Flow

1st scanning

- 高速スキャン(実験スケール)
- ラフな候補事象の選出

2nd scanning

- 候補事象のピンポイント解析
- ピクセルの影響によるleakage event wを除去
- ダスト事象の排除

3rd or more scanning

- 最先端の光学技術等を駆使
- 局在表面プラズモン解析
- 他、ラマン解析、X線解析など

候補事象選出

Random dark noise の除去

シンプルな形状解析

Accidental leakage event :

~ 1 % spherical noise ⇒ to be rejected in 2nd scanning

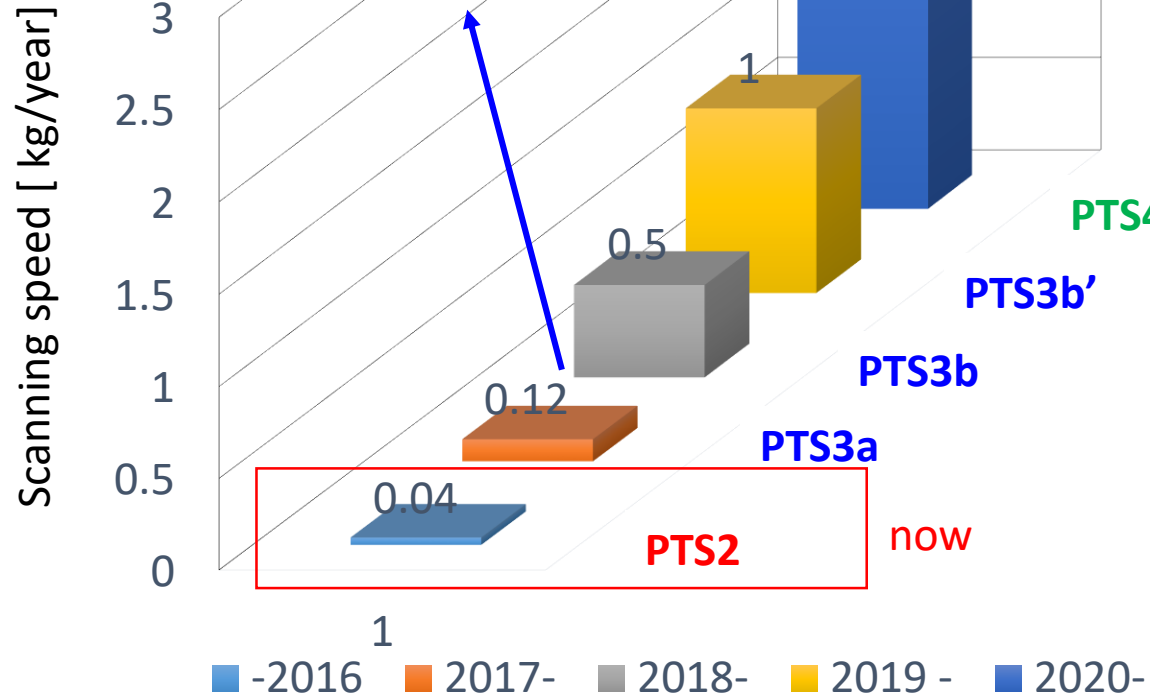
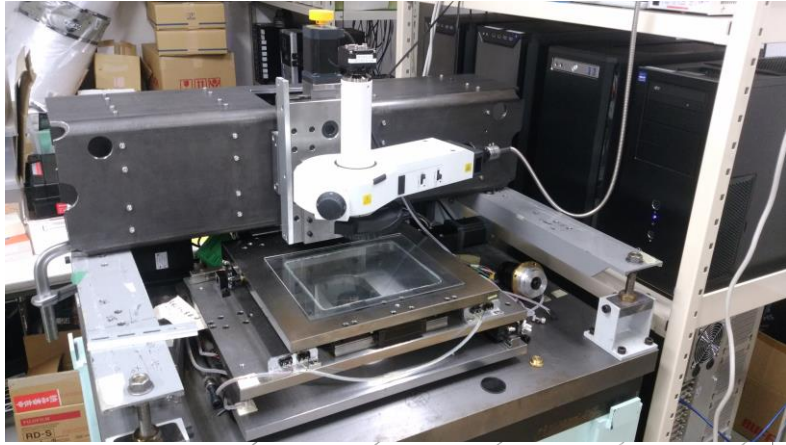
マニュアル解析が必要なところの自動化

1/1000にして次のステージへ

(ここはさらに一桁以上の除去効率を達成したい！)

⇒画像解析の高度化、光学系の改良)

Roadmap of scanning system for nano tracking



[PTS2] 40 g/y (current system)

[PTS3a] 120 g/y expected (x 3 higher than PTS2)
 ⇒ Wider FOV due to higher vision camera

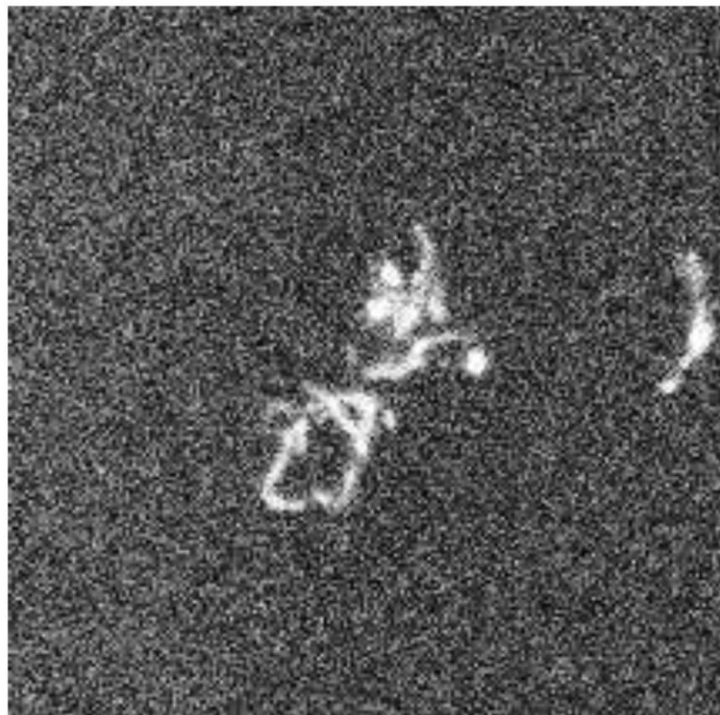
[PTS3b] 500 g/y expected
 ⇒ PTS3a + large DOF system

[PTS3b', PTS4] 1000 - 3000 g/y expected
 ⇒ PTS3b + custom special lens, high framerate

新しい粒子飛跡解析法 ⇒ 局在表面プラズモン共鳴

(Localized surface plasmon resonance : LSPR)

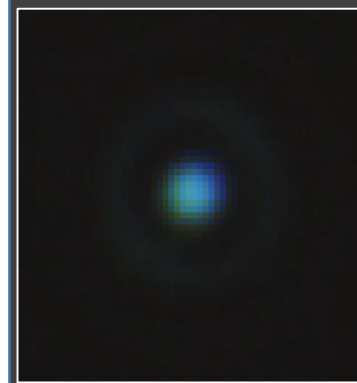
- ナノスケールの情報取得⇒シグナル特有の情報
- 将来的には低エネルギー閾値解析



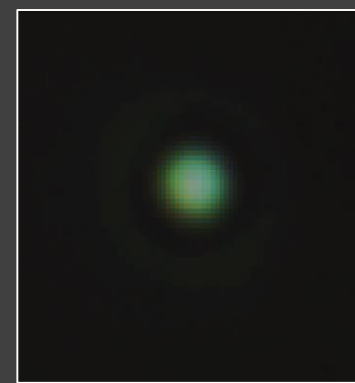
1 μm

- 荷電粒子によって作られた飛跡は、ナノスケールの複雑な構造を持つ
- 光学像だけでは分離が不十分なダスト等とは構造がまったく違う
- この構造は dE/dx に対する依存性も持つ

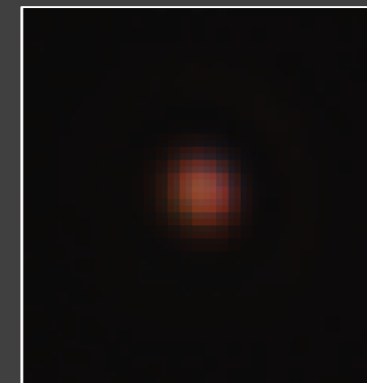
銀のナノ粒子における落射光学顕微鏡像



40 nm



80 nm



120 nm

自由電子の双極子モーメントの情報
⇒ナノスケールの組成+構造の情報取得

- ✓ 数10nmの銀粒子における共鳴波長は、ちょうど可視光波長
- ✓ 共鳴波長は、サイズや形状に強く依存する
- 形状・サイズによるダイポールモーメントの変化
- ⇒ 偏光情報として取得

LSPR analysis system

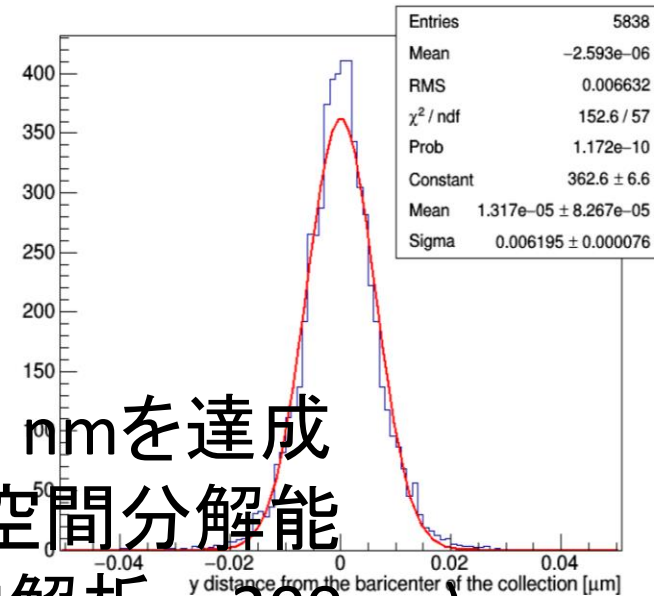
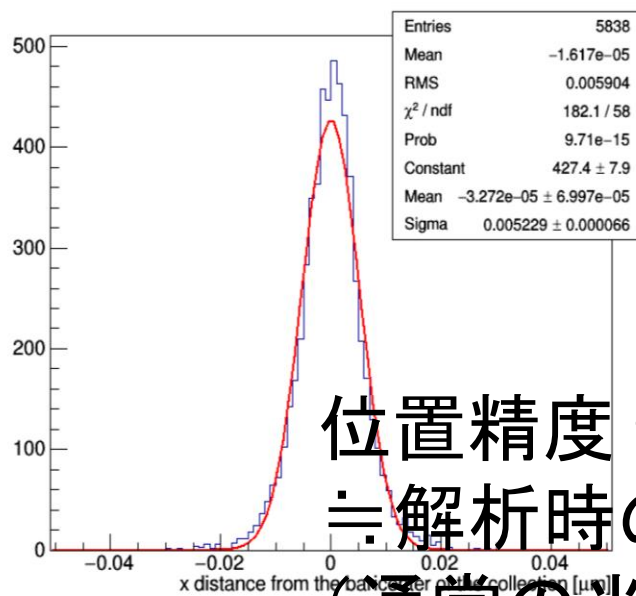


- 液晶偏光ローテータを用いた超解像解析
- カラーイメージデータ解析等

カラー+偏光イメージングデモ

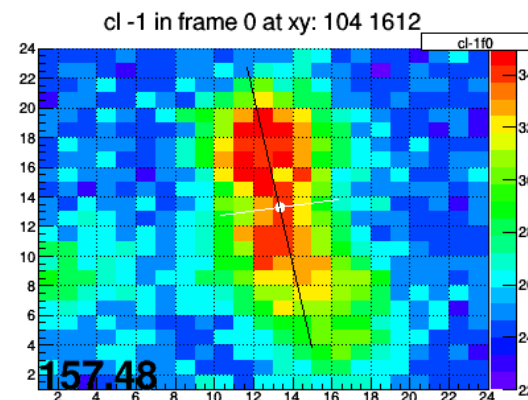
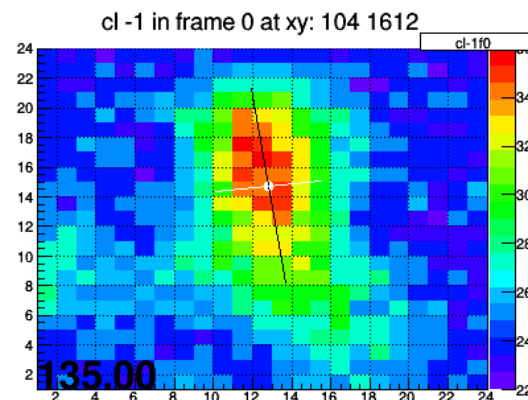
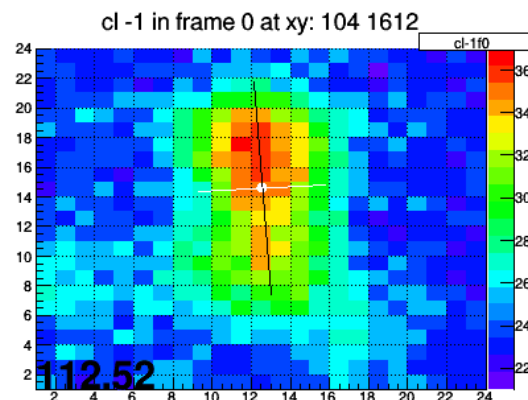
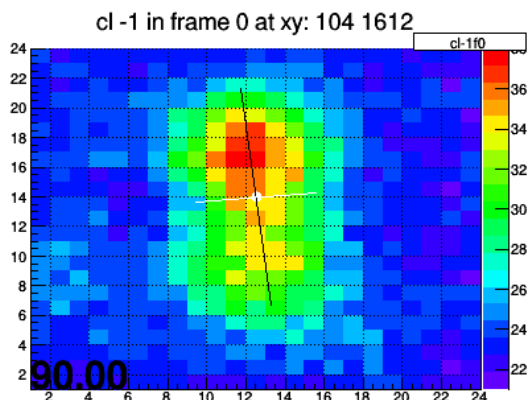
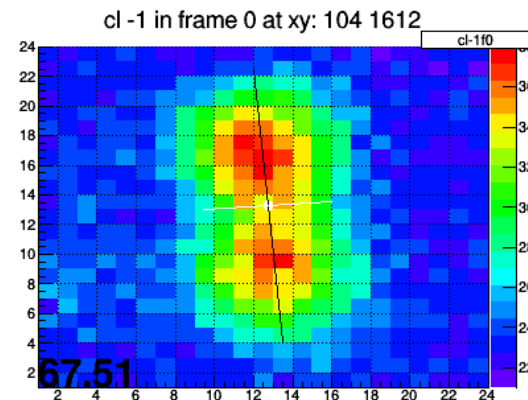
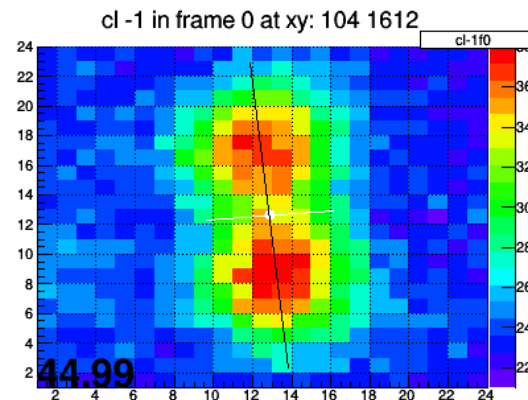
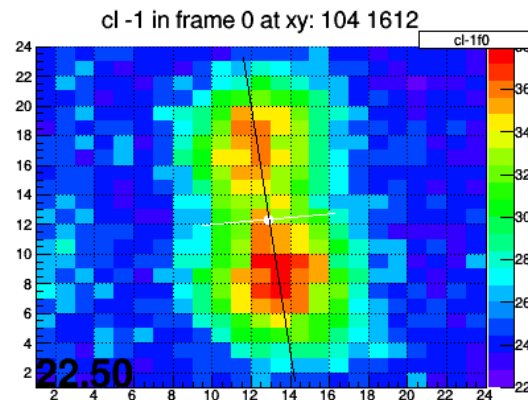
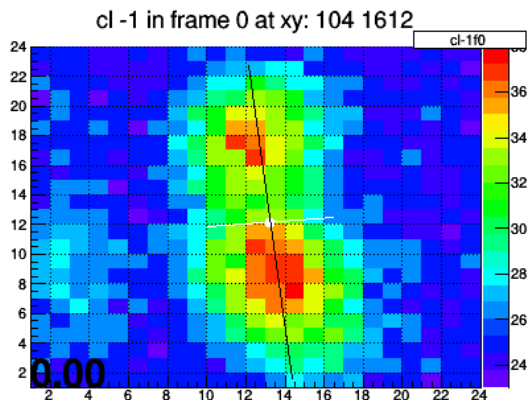


TEM画像
45 nm:120 nm
100 nm



位置精度 ~ 5 nm を達成
≡ 解析時の空間分解能
(通常の光学解析 ~ 200 nm)

ナポリ大システムに導入



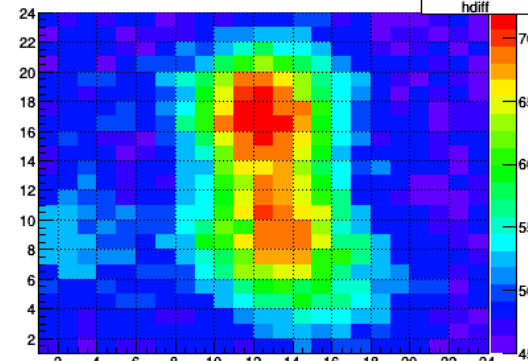
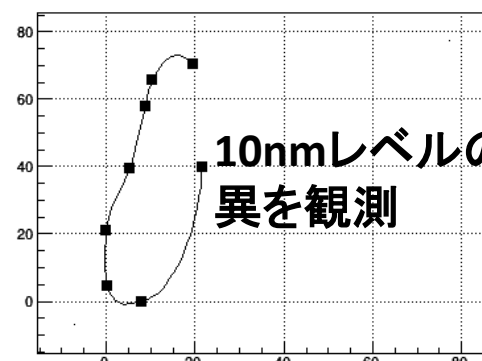
x vs pol [nm]

y vs pol [nm]

y vs x [nm]

img

- ✓ さらに色情報も加えていきたい
- ✓ ピクセルを細かくすることでさらに精細な解析
- ✓ この原理の発展⇒3次元ナノ飛跡解析
- ✓ 機械学習も導入(ロシアのYANDEXの研究者が参画)
- ✓ 処理の高速化⇒解析の効率化



今後

今回のランサンプルの解析が中心

課題:

1. 1st scanningから2,3rd scanningへのつなぎ
(現在、梅本がナポリで研究中)
2. プラズモンデータの解析手法開発
3. キャリブレーションの精密化(反跳原子核事象、電子事象)

今後、データを出していきながら
解析手法の高度化を進める

地下環境:

1. 新たな実験環境整備
2. 検出器マウントのアップグレード
3. キャリブレーションや性能評価体制の構築
4. 地下でのデバイス製造の実現

低バックグラウンド化:

1. デバイスをきれいにする
2. 高分子ポリマー
3. 化学処理の高度化(低バックグラウンド化)
4. 低温デバイスのキャリブレーション

まとめ

□ NEWAGE

- μ PICのバックグラウンドの理解
- 低バックグラウンド30cm角 μ PIC納品
- 材料変更による性能は特に大きな問題なし

⇒NEWAGE0.3bへのインストール＋神岡RUN, (SD, SI)へ

□ NEWSdm

- 新たな解析法の実用化
- 地下でのパイロットランの実施
- データ解析を開発も並行しながら推進中

⇒BGの理解と物理実験へ向けた課題の洗い出し